

// Известия Челябинского научного центра, вып. 1 (31), 2006. 8. Горбачёв А.А. Определение кинематических параметров планетарного глубинного шлифования плоских поверхностей // Авиационно – космическая техника и технология, вып. №2 (18), 2005. 9. Горбачёв А.А. Определение технологических параметров планетарного глубинного шлифования плоских поверхностей // Авиационно – космическая техника и технология, вып. №5 (21), 2005. 10. Качан А.Я., Богуслаев А.В., Мозговой В.Ф., Алексеенко О.В. Глубинное шлифование хвостовиков и бандажных полок рабочих лопаток турбин // Авіаційно-космічна техніка і технологія, вип. №5 (40), 2003

## УДК 621.723

**В.Я. ДАНИЛЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ»

**В.О. ЄВСТРАТОВ**, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

**В.І. КУЗЬМЕНКО**, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРТЯ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ

Для характеристики стану фосфатного мастильного покриття запропоновані нові терміни: скінограма, а також часткові коефіцієнти суцільності  $K_{cz}$  (поздовжній) і  $K_{c\theta}$  (тангенціальний). Для визначення  $K_{cz}$  й  $K_{c\theta}$  створено пристрої ДС-1 й ДС-2, які дозволили визначити  $K_{cz}$  й  $K_{c\theta}$  на будь-якій ділянці контактної поверхні у вигляді скінограми або числа. Експериментально встановлено, що коефіцієнти суцільності залежать від виду операції, форми інструмента й розмірів заготовки. Уведено важливе для підвищення стійкості штамів поняття – діаграма зношування. Дано дефініцію нового для обробки металів тиском терміна – шлях тертя  $L(k)$ . Наведено функцію, за допомогою якої можна обчислити  $L(k)$  залежно від координати  $k$  контактної поверхні деформуючого інструмента. Для визначення тертя на контактних поверхнях інструмента в процесах пластичної деформації автори розробили пристрій ДТ-4, що дозволила визначити  $\tau_k$  при нормальних тисках аж до  $\sigma_n / \sigma_s = 8$ . Експериментально досліджували тертя на контактних поверхнях сталевих фосфатованих зразків, просочених концентратом НБ-5 або господарським милом. На підставі експериментів побудовані графіки залежності коефіцієнта тертя  $\mu_n = \tau_k / \sigma_n$  від нормального тиску  $\sigma_n$  і швидкості переміщення заготовки по інструменту  $v_0$ .

Для характеристики состояния фосфатного смазочного покрытия предложены новые термины: скинограмма, а также частные коэффициенты сплошности  $K_{cz}$  (продольный) и  $K_{c\theta}$  (тангенциальный). Для определения  $K_{cz}$  и  $K_{c\theta}$  созданы устройства ДС-1 и ДС-2, которые позволили определить  $K_{cz}$  и  $K_{c\theta}$  на любом участке контактной поверхности в виде скинограммы или числа. Экспериментально установлено, что коэффициенты сплошности зависят от вида операции, формы инструмента и размеров заготовки. Введено важное для повышения стойкости штампов понятия – диаграмма изнашивания. Дана дефиниция нового для обработки металлов давлением термина – путь трения  $L(k)$ . Приведена функция, с помощью которой можно вычислить  $L(k)$  в зависимости от координаты  $k$  контактной поверхности деформирующего инструмента. Для определения трения на контактных поверхностях инструмента в процессах пластической деформации авторы разработали устройство ДТ-4, что позволило определить  $\tau_k$  при нормальных давлениях вплоть до  $\sigma_n / \sigma_s = 8$ . Экспериментально исследовали трение на контактных поверхностях стальных фосфатированных образцов, пропитанных концентратом НБ-5 или хозяйственным мылом. На основании экспериментов построены графики зависимости коэффициента трения  $\mu_n = \tau_k / \sigma_n$  от нормального давления  $\sigma_n$  и скорости перемещения заготовки по инструменту  $v_0$ .

For phosphate lubrication coating state analysis we define such terms as scinogramm and also partial coefficients of lubricant coating ratio  $K_{cz}$  (longitudal) and  $K_{c\theta}$  (tangential). For their experimental

investigation we created the installations ДС-1 and ДС-2. They give us the possibility to define  $K_{cz}$  and  $K_{c0}$  on any part of contact surface as the scinogramm or definite number. Important for tool wear rise conception – wear diagram – is inserted. The definition of new term for mechanical working – path of friction  $L(k)$  – is given. There is given also the function for calculating  $L(k)$  as a function of contact surface coordinate  $k$ . For definition of friction on tool contact surfaces in processes of plastic deformation authors worked out the unit, which allowed to define  $\tau_k$  under normal pressure up to  $\sigma_n / \sigma_s = 8$ . The friction on contact surfaces of steel phosphate specimens which were impregnated by the concentrate НБ-5 or soap was investigated in the experimental researches. On the base of our experiments the graphs of friction coefficient  $\mu_n = \tau_k / \sigma_n$  dependence of normal pressure and velocity of specimen movement on the surface of tool were built.

Відома велика кількість робіт з тертя. Однак у них не висвітлені наступні важливі питання: 1) як розподіляється мастило по контактній поверхні інструмента в процесі деформування металу, як залежить контактне дотичне напруження від умов деформації й координат контактної поверхні  $\tau_k(k, l)$ , де  $k, l$  – узагальнені координати контактної поверхні інструмента ( $x, y, z, r, \theta, z$  і т.п.); 2) чим принципово відрізняється тертя в машинних парах від тертя при обробленні металів тиском; 3) як виміряти тертя при дуже великих нормальних напруженнях на контактних поверхнях заготовки, що характерні для процесів видавлювання й холодного об'ємного штампування.

Пропонована читачеві стаття присвячена відповідям на ці важливі питання.

1. У класичних роботах з тертя (наприклад, у роботах Ф. Боудена й Д. Тейбора) показано, що контактне дотичне напруження  $\tau_k$ , а виходить, сила тертя, зношування інструмента і якість деталей, тісно пов'язані зі станом мастильного покриття. Залежність між  $\tau_k$  й коефіцієнтом металевого контакту, яка отримана Ф. Боуденом і Д. Тейбором, у наших позначеннях можна представити у вигляді

$$\tau_k = (1 - K_c) \tau_s + K_c \tau_m. \quad (1)$$

Тут  $\tau_s$  й  $\tau_m$  – дотичні напруження плинущого основного металу й мастила відповідно, МПа;  $K_c$  – коефіцієнт суцільності мастильного покриття (у Ф. Боудена й Д. Тейбора  $(1 - K_c)$  – коефіцієнт металевого контакту).

Однак у згаданих роботах не розглядається питання про те, як саме мастило розподіляється в процесі деформування заготовки, як визначити коефіцієнт металевого контакту. Авторам удалося відшукати методику, що дозволила зафіксувати стан мастильного покриття безпосередньо в процесі деформування. Для холодного видавлювання сталевих деталей використовують тверде пористе підмастильне покриття (фосфат цинку або марганцю), що просочують мастилом (звичайним господарським милом, або концентратом НБ-5). Фосфатна плівка міцно втримується на поверхні деформованої заготовки й служить екраном, який перешкоджає утворенню когерентних зв'язків між металом заготовки й металом інструмента, а мастило зменшує тертя між заготовкою та контактними поверхнями.

Товщина підмастильного покриття (фосфатної плівки) становить 25...40 мкм. У процесі видавлювання у зв'язку зі значною пластичною деформацією заготовки її форма й розміри змінюються, а фосфатна плівка стоншується. Наприклад, при видавлюванні деталей типу стаканів на зовнішній поверхні плівка стоншується у 1,5...2,0 рази, а на внутрішній поверхні – аж у 10...12 разів. Якщо товщина фосфатної плівки перевищує 5 мкм, то вона зберігає суцільність. Якщо ж товщина плівки стає меншою за 5 мкм, то вона здобуває острівкову будову. Однак, коли плівка підмастильного покриття стоншується й розривається, мастило з контактних повер-

хонь під дією високих нормальних напружень частково або повністю видавлюються, екранування порушується, утворюються ювенільні поверхні, по яких відбувається схоплювання металу заготовки з металом інструмента. Цей факт підтвердили дослідження, які проведені на рентгенівському мікроаналізаторі MAP-2.

Утворення на заготовках поверхонь, вільних від фосфатного покриття й мастила (ми назвали такі поверхні ювенільними), призводить до катастрофічного зношування інструмента, значного збільшення зусилля деформації й різкого погіршення якості виготовлених деталей (на їхніх поверхнях утворюються глибокі риски).

Тому для нормального протікання процесів деформації сталевих деталей необхідно надійне екранування поверхні заготовки. Це можна зробити, знаючи закономірності розподілення фосфатного покриття.

Для характеристики стану фосфатного покриття авторами запропоновано використати **коефіцієнт суцільності покриття  $K_c$**

$$K_c = (A_\delta - \Sigma A_{\text{ю}}) / A_\delta. \quad (2)$$

Тут  $A_\delta$  – площа базової ділянки, на якій визначається коефіцієнт суцільності,  $\text{м}^2$ ;  $\Sigma A_{\text{ю}}$  – сума площ ювенільних (вільних від фосфатного покриття) ділянок поверхні в межах базової ділянки вимірювання,  $\text{м}^2$ .

Фосфатне покриття тверде, тому його стан після деформації такий же, як й у процесі деформації (при видавлюванні). Тому коефіцієнт суцільності покриття  $K_c$ , виміряний на поверхні вже видавленої деталі, може адекватно характеризувати саме ті умови екранування, які мали місце в процесі деформування.

Значення  $K_c$  по формулі (2) визначити відомими інструментальними засобами неможливо. Тому автори запропонували визначати часткові коефіцієнти суцільності: поздовжній  $K_{cz}$  і тангенціальний  $K_{c\theta}$ :

$$K_{cz} = (L_\delta - \Sigma L_{\text{ю}}) / L_\delta; \quad K_{c\theta} = (T_\delta - \Sigma T_{\text{ю}}) / T_\delta, \quad (3)$$

Тут  $L_\delta$  й  $T_\delta$  – довжини базових ділянок, на яких визначається коефіцієнт суцільності уздовж напрямку плину металу й по колу відповідно,  $\text{м}$ ;  $\Sigma L_{\text{ю}}$  й  $\Sigma T_{\text{ю}}$  – сума довжин ювенільних (вільних від фосфатного покриття) ділянок поверхні в межах базових ділянок вимірювання,  $\text{м}$ .

Використовуючи такий підхід, можна за допомогою **скінограми** поверхні визначити коефіцієнт суцільності покриття, зокрема фосфатного, яке що екранує контактну поверхню інструмента.

**Скінограма** – це новий термін, запропонований авторами, який представляє собою графічну характеристику суцільності фосфатного покриття у вигляді осцилограми синусоїдальної кривої, амплітуда якої різко зменшується на ювенільних поверхнях (рис. 1).

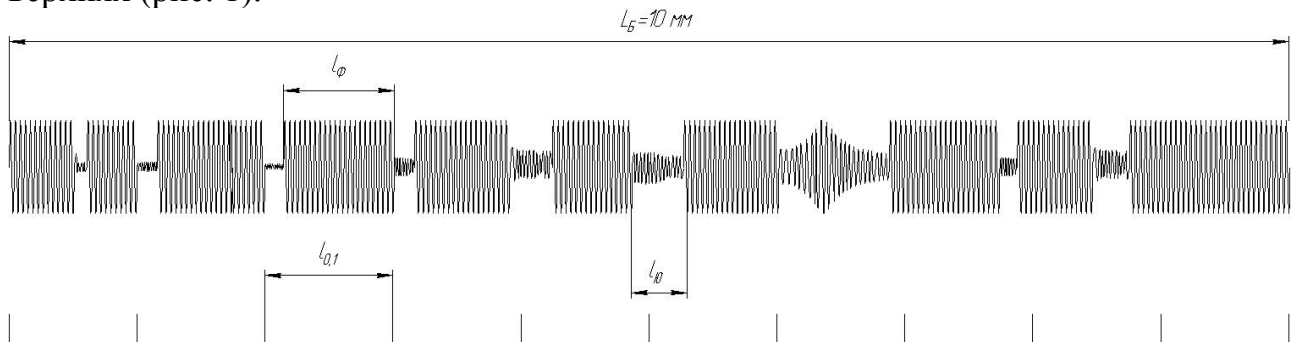


Рис. 1. Зразок скінограми

Чисельні значення  $K_{cz}$  й  $K_{c\theta}$  можуть бути визначені на пристроях ДС-1 та ДС-2, які сконструйовані авторами. Принцип їхньої дії досить простий. На рис 2 показана структурна схема пристрою ДС-1 для визначення поздовжнього коефіцієнта суцільності  $K_{cz}$ .

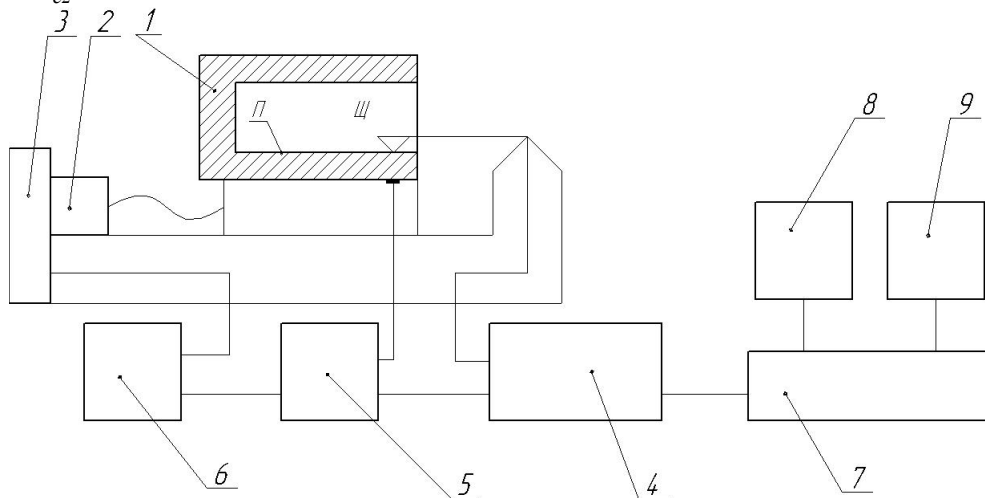


Рис. 2. Структурна схема пристрою ДС-1

Видавлена заготовка 1 встановлена на каретку, що рухається разом з видавленою деталлю. По досліджуваній поверхні П переміщується щуп Щ, на який подається змінна (синусоїдальна) електрична напруга. При русі заготовки уздовж її осі щуп ковзає уздовж твірної то по фосфатній поверхні шару, що екранує, то по металевій поверхні деталі (де фосфатна плівка розірвана). Фосфатний шар електричного струму не проводить. Тому в першому випадку ланцюг «щуп – деталь» розмикається. Коли ж щуп ковзає по ювенільній поверхні, то ланцюг «щуп – деталь» замикається. Це реєструється на стрічці осцилографа у вигляді скінограми. Розшифровка скінограми (осцилограми) дозволяє визначити  $K_{cz}$  на будь-якій ділянці поверхні. Скінограми дають наочне уявлення про топографію розривів підмастильного покриття, однак вимагають трудомісткого розшифрування. Тому передбачено роботу пристрою ДС-1 у режимі рахунку. Один з перерахункових пристроїв (8) включено так, що він фіксує усі імпульси, які подаються на щуп при його ковзанні уздовж твірної досліджуваної поверхні. Інше (9) – за допомогою схеми збігів фіксує тільки ті імпульси, які подаються на щуп у той момент, коли він ковзає по фосфатній поверхні. Завдяки цьому чисельне значення  $K_{cz}$  можна виразити як відношення показань перерахункових пристроїв.

Аналогічним образом працює й пристрій ДС-2. Він дозволяє визначити тангенціальний коефіцієнт суцільності  $K_{c\theta}$ . Єдине розходження полягає в тому, що замість каретки (яка у пристрої ДС-1 рухається в поздовжньому напрямку), пристрій ДС-2 містить поворотний столик (разом з яким обертається видавлена деталь). При обертанні деталі щуп ковзає по досліджуваній поверхні в тангенціальному напрямку (перпендикулярно до напрямку твірної, тобто по колу), а установка або записує осцилограму, або рахує кількості імпульсів лічильниками 8 й 9.

Рівняння (1) виведене Ф. Боуденом і Д. Тейбором у припущенні, що мастило не переноситься на незмащені ділянки. У реальних умовах видавлювання сталевих деталей (коли фосфатна плівка просочена ефективним мастилом) таке припущення сумнівне. Наші дослідження показали, що при  $K_c > 0,6$  експериментальні точки лягають нижче лінії, що описується рівнянням Ф. Боудена й Д. Тейбора. При  $K_c > 0,6$  значення  $\tau_k$  досить мало відрізняється від  $\tau_m$ . Експериментальні дослідження з визна-

чення контактних дотичних напружень  $\tau_k$  проводили за допомогою трибометра типу ГП (Н. М. Михина).

На підставі статистичних даних для фосфату марганцю товщиною 25...45 мкм із наступним просоченням милом авторами отримана залежність між  $\tau_k(k, l)$  і  $K_c(k, l)$  у такій формі

$$\tau_k(k, l) = (0,52 - 0,85K_c(k, l) + 0,51K_c(k, l)^2) \sigma_s. \quad (4)$$

Тут  $\sigma_s$  – напруження плину металу деформованої заготовки, МПа;  $\tau_k(k, l)$  – контактне дотичне напруження на поверхні видавлюваної деталі (МПа), що залежить від координати  $k$ , м; глибини видавлюваної порожнини  $l$ , м;  $K_c(k, l)$  – поздовжній коефіцієнт суцільності фосфатного покриття, який залежить від координати  $k$  (м) і глибини видавлюваної порожнини  $l$  (м).

Експериментальні дослідження показали, що чисельні значення  $K_c(k, l)$  сильно залежать від глибини видавлюваної порожнини, координати  $z$  і форми голівки пуансона. Отримано досить складне кореляційне рівняння виду  $K_c = F(\lambda_n, \alpha_z, r_k, \psi)$ , по якому можна визначити залежність зміни  $K_c$  по глибині видавлюваної порожнини ( $\lambda_n$ ), залежно від форми голівки пуансона (куту скосу  $\alpha_z$ , а також відносному радіусу округлення калібрувального паска  $r_k$ ) і ступеня деформації заготовки  $\psi$ .

Наведені дані дозволяють визначити залежність зміни  $K_c$  від глибини видавлюваної порожнини, знайти уздовж всієї контактної поверхні напруження тертя  $\tau_k$  для різних форм голівки пуансона й ступенів деформації. Рішення цієї задачі показує підходи до оптимізації конструкцій інструмента для холодного видавлювання деталей типу стаканів із заготовок, які покриті фосфатною плівкою й просочені відповідними мастилами, зокрема хазяйським милом або концентратом НБ-5 (рис. 3).

Методика визначення  $K_c$  становить інтерес для встановлення особливостей тертя в умовах пластичного контакту при наявності твердої плівки, що екранує (наприклад, фосфатного шару).

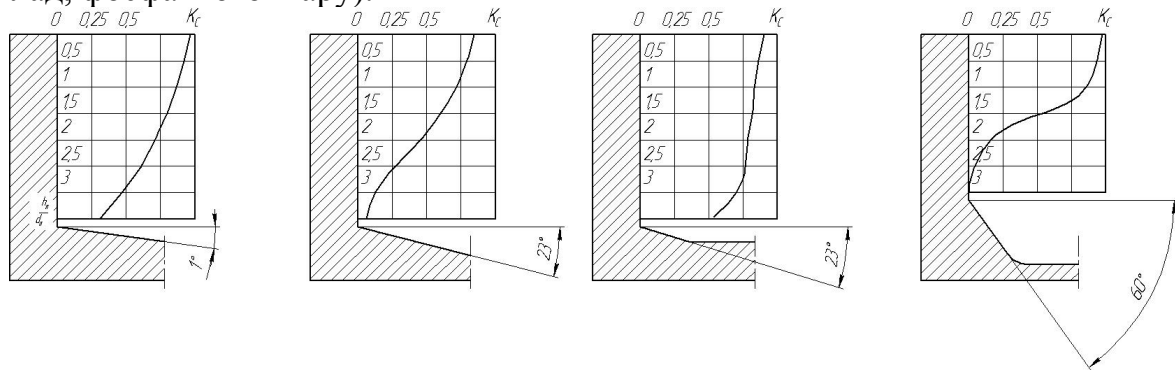


Рис. 3. Залежність зміни  $K_c$  від глибини видавлюваної порожнини і форми голівки пуансона

2. Відомо, що зношування інструмента для оброблення металів тиском відбувається нерівномірно: є області, у яких зношування йде надзвичайно інтенсивно. Наприклад, у відкритих штампах об'ємного штампування це область гратового містка, у штампах для витягування – тороподібна поверхня матриці, у штампах для холодного видавлювання – бічна поверхня матриці й калібруючий пасок пуансона. Показати різну інтенсивність зношування можна дуже наочно за допомогою так званих **діаграм зношування**.

*Діаграмою зношування* домовимось називати залежність зношування контактної поверхні штампів  $W(k)$  від координати  $k$  її поверхні, а також від числа виготовлених деталей  $N$ .

Аналіз діаграм зношування для різних видів інструмента (молотових штампів, штампів для витягування тощо) показав, що інтенсивність зношування  $dW/dN$  змінюється в широких межах залежно від умов видавлювання, у числі яких варто виділити *шлях тертя*  $L(k)$ . У різних частинах контактної поверхні інструмента  $L(k)$  різний і залежить від координати  $k$ .

На відміну від тертя в машинних парах, де шлях тертя визначається як сумарне лінійне переміщення одного з елементів, у процесах ОМД шлях тертя як фізична величина ще навіть не визначена. Щоб усунути цю прогалину, уведемо наступне визначення: **Шлях тертя**  $L(k)$  – це функція координати  $k$  контактної поверхні деформуючого інструмента, що визначається сумарним переміщенням часток деформованої заготовки щодо розглянутої точки контактної поверхні інструмента в заданому напрямку  $k$ :

$$L(k) = \int_{t(k)_n}^{t(k)_k} v_{\tau} dt . \quad (5)$$

Тут  $v_{\tau}$  – дотична складова швидкості переміщення заготовки щодо інструмента (у змінних Ейлера), м/с;  $t(k)_n$  та  $t(k)_k$  – час у секундах початку й кінця руху часток металу в точці з координатою  $k$ .

**Наочно це можна показати на прикладі зношування матриць для холодного видавлювання (рис. 4). Розрахунок шляху тертя для різних матриць показав, що  $L(k)$  не залежить від швидкості пуансона  $v_n$ , але сильно залежить від координати  $k$  точки контактної поверхні матриці, розмірів заготовки, а також відносного радіуса пуансона. Відмінність у шляхах тертя визначає розходження в інтенсивності зношування матриць.**

Треба підкреслити, що шлях тертя, який розрахований по формулі (5), істотно більший, ніж простий зсув заготовки відносно матриці. Це особливо характерно для прямого видавлювання стрижневих деталей, пресування, об'ємного штампування.

Аналіз діаграм зношування матриць для зворотного й прямого видавлювання показав, що зношування  $W(z)$  пов'язане із числом видавлених деталей  $N$  і відносним шляхом тертя  $L(z)/L_0$  залежністю, близькою до лінійної, котру можна представити в такому виді:

$$W(z) = \Phi(VB) \frac{L(z)}{L_0} N . \quad (6)$$

Тут  $\Phi(VB)$  – експериментально визначена функція, яка залежить від умов видавлювання (матеріалу заготовки і її твердості, ступеня деформації, матеріалу й твердості матриці, умов тертя, швидкісного режиму деформації, коефіцієнта суцільності мастильного покриття), мм/шт;

$L(z)$  – шлях тертя для даної деталі в напрямку координати  $z$ , м;

$L_0$  – базовий шлях тертя, для якого визначена функція  $\Phi(VB)$ , м.

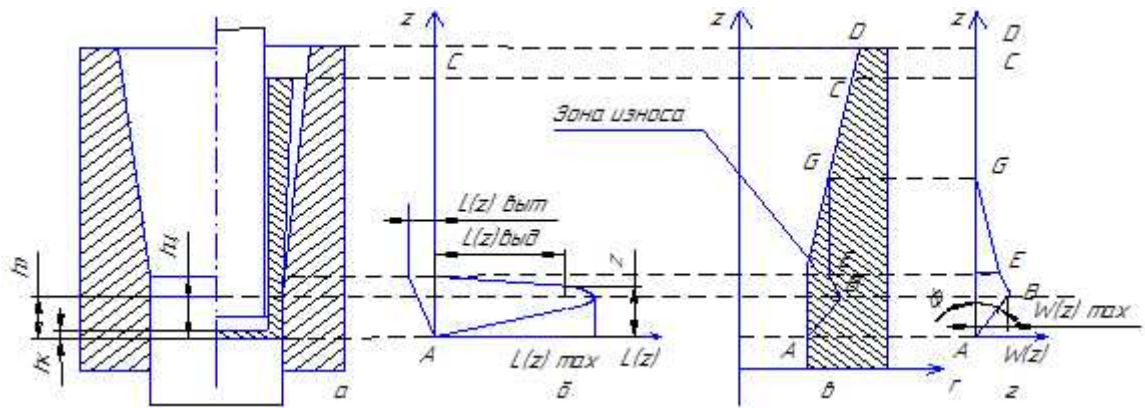


Рис. 4. Схема видавлювання стакана в конічній матриці (а), графік зміни шляху тертя

при видавлюванні  $L(z)_{\text{вип}}$  та виштовхуванні  $L(z)_{\text{випит}}$  (б); крива зміни макроеометрії матриці для фіксованого  $N$  (в); діаграма зношування для фіксованого  $N$  (г):  $ABEGCD$  – контур робочої поверхні матриці після видавлювання  $N$  заготова-  
НОК

Аналіз діаграм зношування матриць для зворотного й прямого видавлювання показав, що зношування  $W(z)$  пов'язане із числом видавлених деталей  $N$  і відносним шляхом тертя  $L(z)/L_0$  залежністю, близькою до лінійної, котру можна представити в такому виді:

$$W(z) = \Phi(VB) \frac{L(z)}{L_0} N. \quad (7)$$

Тут  $\Phi(VB)$  – експериментально визначена функція, яка залежить від умов видавлювання (матеріалу заготовки і її твердості, ступеня деформації, матеріалу й твердості матриці, умов тертя, швидкісного режиму деформації, коефіцієнта суцільності мастильного покриття),  $\text{мм/шт}$ ;

$L(z)$  – шлях тертя для даної деталі в напрямку координати  $z$ ,  $\text{м}$ ;

$L_0$  – базовий шлях тертя, для якого визначена функція  $\Phi(VB)$ ,  $\text{м}$ .

3. Як виміряти тертя при дуже великих нормальних напруженнях, які характерні для процесів об'ємного штампування й видавлювання?

Відомі експериментальні методи визначення тертя на контактних поверхнях інструмента при пластичній деформації дозволяють знайти значення  $\tau_k$  при нормальному тиску, що не перевершує  $2\sigma_s$ , у той час, як при операціях об'ємного штампування й видавлюванні нормальний тиск значно перевершує це значення. Щоб розширити можливості експериментального дослідження й одержати залежність для визначення  $\tau_k$  при нормальних напруженнях до  $\sigma_n / \sigma_s = 8$ , автори розробили пристрій ДТ-4.

На рис. 5 представлена схема пристрою ДТ-4, що має ряд переваг у порівнянні з іншими відомими конструкціями. Він забезпечує: 1) створення схеми всебічного нерівномірного стиску при високих значеннях гідростатичного тиску; 2) одержання в процесі одного експерименту безперервного ряду нормальних тисків  $\sigma_n$  від 0 до 2500 МПа (що приблизно відповідає збільшенню відносного нормального тиску  $\sigma_n / \sigma_s$  від 0 до 8); 3) можливість вимірювання температури безпосередньо в зоні пластичного контакту; 4) можливість досить простого й не трудомісткого розшифрування результатів.

Досліджуваний зразок 9 (див. рис. 5) розміщується в циліндричній порожнині діаметром 70 мм і висотою 45 мм між чотирма напівциліндричними вкладишами 10, 16, обмежувальними напівкільцями 7 і розрізними напівциліндричними матрицями 8, у яких нарізані трикутні кільцеві канавки. В отворі зразка розміщена конічна частина оправки 15. При переміщенні оправки униз її конічна поверхня роздає зразок. Обмежувальні кільця виключають осьовий плин металу, тому в зразку має місце тільки радіальний плин. Зовнішня поверхня зразка вдавлюється в матрицю й заповнює наявні в ній трикутні кільцеві канавки. Оскільки при цьому відбувається плин металу в східчасті щілини, ширина яких зменшується до нуля, то напруження, яке необхідне для затікання металу у канавки, може збільшуватись необмежено. Очевидно, що, вимірявши силу проштовхування оправки й силу розпору матриці, можна розрахувати нормальні й дотичні напруження на поверхні контакту зразка з оправкою.

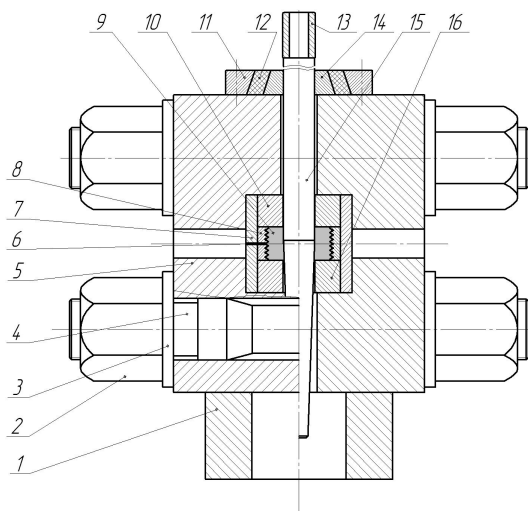


Рис.5. Пристрій для дослідження тертя

Для вимірювання сили проштовхування оправки й розрахунку напруження тертя передбачений тензометричний первинний перетворювач (датчик сили) 13. Для забезпечення точного поступального руху оправки у пристрої передбачене точне центрування циліндричної частини оправки за допомогою бронзового кільця 14, яке розміщене в гумовій обоймі 12. Для можливості вимірювання сили розпору матриці й розрахунку нормального тиску установка виконана із двох напівкорпусів 5, що розрізані по площині, яка проходить через вісь оправки, і з'єднані чотирма тензометричними шпильками 4. У напівкорпусах виконані отвори 6, які призначені для вибивання деформованого зразка й вставок, а також для введення термопари.

Зразки для експериментальних досліджень у вигляді розрізних кілець із діаметром отвору  $d$  і зовнішнім діаметром  $D$  виготовляли точінням зі сталей 10кп й 55пп. Діаметр  $d$  всіх зразків був постійним, рівним меншому діаметру конічної частини оправки. Зовнішній діаметр зразків  $D$  варіювали (приймали  $(D - d)$  від 8 до 11 мм), щоб одержати різні значення нормального тиску; при цьому використовували матриці з відповідними різними діаметрами порожнини й різних розмірів канавок.

Конструкція пристрою передбачає можливість встановлення термопари для виміру температури зразка у приконттактному шарі.

Тертя досліджували на фосфатованих зразках, просочених концентратом НБ-5 або господарським милом. Застосовували стандартні технології й режими фосфатування й нанесення мастила.



У процесі експериментального дослідження записували (осцилографували) значення сили проштовхування оправки й розпирних сил. Осцилограми мають чітко виражені особливості. Так, коли усередині зразка переміщується конічна частина оправки, на осцилограмах спостерігається інтенсивне збільшення сили проштовхування оправки і зростання розпирних сил. Далі спостерігаємо перехід на циліндричну поверхню оправки, тому сили проштовхування й розпору знижуються. Нарешті, коли у зразку рухається циліндрична частина оправки, сили залишаються практично незмінними.

Осцилограми розшифровували за допомогою градуювальник графіків, які будували до й після експерименту. Для розрахунку сил використали розрахункові схеми, наведені на рис. 6, де показані навантаження, що діють на контактних поверхнях зразка й оправки.

При русі циліндричної ділянки оправки з умов рівноваги  $\sum F_z = 0$  й  $\sum F_r = 0$  одержуємо наступні співвідношення для нормальних  $\sigma_n$  і дотичних  $\tau_k$  напружень, а також для показника тертя.

$$\sigma_n = \frac{F_p}{2Rh \sin(\varphi/2)}; \quad \tau_k = \frac{F_i}{2Rh \varphi}; \quad K_\mu = \frac{\tau_k}{\sigma_n} = \frac{F_i \sin(\varphi/2)}{F_p \varphi}, \quad (8)$$

де  $F_p$  – сила розпору, Н;  $F_n$  – сила проштовхування оправки, Н;  $R$  – радіус циліндричної частини оправки, м;  $h$  – висота зразка, м;  $\varphi$  – центральний кут, що визначає довжину периметра половинки зразка, рад;  $\sigma_n$ ,  $\tau_k$  нормальні і дотичні напруження – Па.

Показник тертя  $K_\mu$  розраховували при терті, яке характерне для жорстких зон заготовки, у яких деформація або ще не почалася, або вже закінчилася.

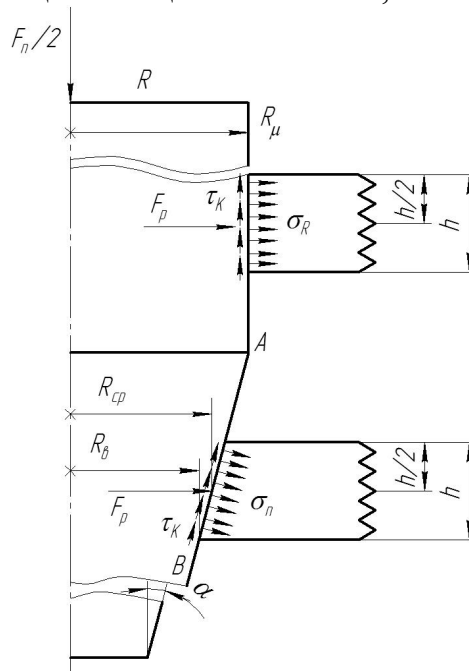


Рис.6. Розрахункова схема для циліндричної та конічної ділянок оправки.

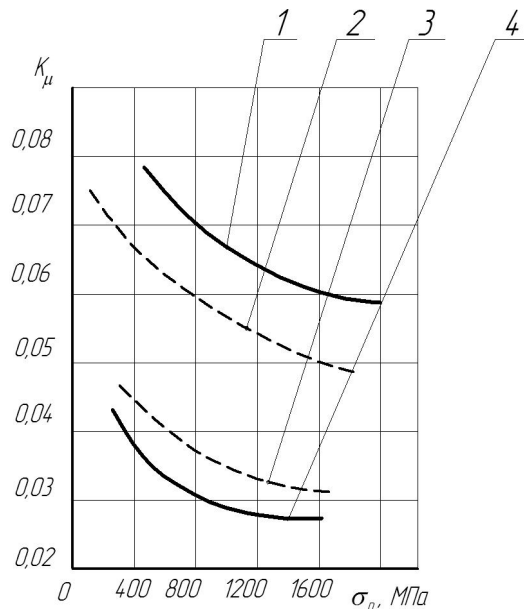


Рис.7. Залежність показника тертя  $K_\mu$  від нормального тиску, виду мастила та швидкості деформування:

- 1 – мастило НБ-5, швидкість  $v_0 = 0,01$  м/с;
- 2 – мило господарське, швидкість  $v_0 = 0,01$  м/с;
- 3 – мило господарське, швидкість  $v_0 = 0,3$  м/с;
- 4 – мастило НБ-5, швидкість  $v_0 = 0,3$  м/с.

При русі конічної ділянки оправки з умов рівноваги  $\sum F_z = 0$  й  $\sum F_r = 0$  одержані вирази для нормальних  $\sigma_n$  і дотичних  $\tau_k$  напружень, а також для показника тертя  $K_\mu$ .

На підставі експериментів побудовані графіки залежності  $K_\mu$  від  $\sigma_n$  й  $v_0$  (рис. 7) для двох мастил: мила й концентрату НБ-5. З рис. 7 видно, що зі збільшенням  $\sigma_n$  значення  $K_\mu$  убуває за законом, що близький до експонентного. Зі збільшенням швидкості деформування  $K_\mu$  зменшується лінійно при збереженні експонентної залежності від  $\sigma_n$ . Вид мастила неоднозначно впливає на показник тертя. При малих швидкостях деформування мило в порівнянні із НБ-5 забезпечує більш низькі значення  $K_\mu$ , а при більших швидкостях деформування це співвідношення міняється на протилежне.

Дещо несподіваним виявилось те, що зміна шорсткості деформуючого інструмента в межах  $Ra = 0,63 \dots 0,08$  мкм практично не впливає на значення  $K_\mu$ . Встановлено, що значення показника тертя  $K_\mu$  в умовах холодного видавлювання з якісним фосфатним покриттям і змащенням милом або концентратом НБ-5 не залежить від границі текучості деформованого металу, а є функцією нормальних контактних напружень  $\sigma_n$ , швидкості деформування  $v_0$  і виду мастила.

Для використання отриманих експериментальних залежностей при розрахунках втрат на тертя в теоретичних рішеннях функцію  $K_\mu = F(\sigma_n, v_0)$  апроксимували для двох видів мастил наступним виразом:

$$K_\mu = \frac{a}{b + v_0} + c e^{-d\sigma_n}. \quad (9)$$

Коефіцієнти  $a$ ,  $b$ (м/с),  $c$ ,  $d$ (1/МПа) визначали на основі отриманих експериментальних даних, користуючись методом найменших квадратів Для досліджених мастил одержали наступні значення:

	a	b	c	d
Концентрат НБ-5	0,0064	0,127	0,041	0,0011
Мило господарське	0,012	0,298	0,041	0,0011

### Висновки.

1. Запропоновано спосіб оцінки суцільності мастильного покриття за допомогою скінограми й часткових коефіцієнтів суцільності: поздовжнього  $K_{cz}$  і тангенціального  $K_{c\theta}$ .

2. Для експериментального визначення чисельних значень  $K_{cz}$  й  $K_{c\theta}$  авторами сконструйовані пристрої ДС-1 й ДС-2.

3. На підставі кореляційного аналізу встановлена залежність між контактним дотичним напруженням  $\tau_k(k, l)$  і коефіцієнтом суцільності мастильного покриття  $K_c(k, l)$ .

4. Уведено важливе для оцінки зношування поняття – шлях тертя – і показаний спосіб його обчислення.

5. Дослідження показали: якщо  $K_c$  близький до 1, то тертя не залежить від властивостей деформованого матеріалу й шорсткості інструмента (у межах  $Ra = 0,63...0,08$ ), а основний вплив на  $\tau_k$  мають три чинники: нормальне напруження на контактній поверхні  $\sigma_n$ , швидкість переміщення заготовки по інструменту  $v_0$  і вид мастила. Для розрахунку  $\tau_k$  можна використати формулу (7), де  $K_\mu = \tau_k / \sigma_n$  – коефіцієнт кулонового тертя.

Якщо ж змащування не настільки ефективно, як фосфатування із просоченням ефективним мастилом (милом або концентратом НБ-5), або ж процес характеризується значними розривами підмастильного покриття, коли  $K_c \ll 1$ , то для розрахунку  $\tau_k$  треба використовувати формулу Зібеля  $\tau_k = \mu \sigma_s$ .

## ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

УДК 621.771.669

**СМИРНОВ Е.Н.**, докт. техн. наук, проф., Дон НТУ, г. Донецк

**СНИТКО С.А.**, канд. техн. наук, доц., Дон НТУ, г. Донецк

**СПИРИДОНОВ Д.В.**, нач. техн. отд., ОАО «АЗОЦМ», г. Артемовск

**ЭТИГИН С.О.**, магистр, Дон НТУ, г. Донецк

### ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ СПЛАВА CuZn39Pb3 МЕТОДОМ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований пластичности свинцовистой латуни.